

Le kelvin redéfini en 2019

Lucile Julien, professeure émérite à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), laboratoire Kastler Brossel.

Comme trois autres des unités de base du système international (SI), le kilogramme, l'ampère et la mole, le kelvin est redéfini en 2019 en fixant la valeur numérique d'une constante de la physique, ici la constante de Boltzmann k .

Depuis 1954, le kelvin était défini ainsi : « Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau ». Il avait donc une place particulière parmi les sept unités de base du SI, avec une définition déconnectée de celles des autres unités.

À partir du 20 mai 2019, sa définition devient : « Le kelvin, symbole K, est l'unité de température thermodynamique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann k , égale à $1,380649 \times 10^{-23}$ lorsqu'elle est exprimée en $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$, unité égale à $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Le kilogramme, le mètre et la seconde étant définis en fonction de h , c et $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ». Ainsi, en fixant la valeur de k , l'unité de température se trouve définie à partir de l'unité d'énergie, c'est-à-dire à partir des unités de masse, de longueur et de temps, elles-mêmes définies en donnant des valeurs fixées respectivement à la constante de Planck h (ce qui est nouveau), à la vitesse de la lumière c (depuis 1983) et à la structure hyperfine du césium $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ (depuis 1967).

Tout comme l'énergie de masse est donnée par la célèbre formule d'Einstein $E = mc^2$ et l'énergie d'un photon de fréquence f est donnée par $E = hf$, l'énergie thermique est en effet de la forme $E = kT$ où T est la température ; et c'est ce produit qui apparaît dans de nombreuses lois physiques faisant intervenir la température. Ce sont ces lois physiques qui sont utilisées dans les échelles de températures pour la réalisation pratique du kelvin. Citons à titre d'exemple les lois de variation avec la température de la pression d'un gaz, d'une résistance de platine, du rayonnement du corps noir, etc.

Avant de donner une valeur fixée à la constante de Boltzmann, il a fallu la mesurer le mieux possible dans le cadre des anciennes définitions des unités qui avaient cours. La date limite pour collecter tous les résultats des mesures, pour cette constante comme pour les autres, avait été fixée au 30 juin 2017. Après cette date a été réalisé par le CODATA (Committee on Data for Science and Technology) un ajustement par moindres carrés, à partir de toutes les données disponibles, des constantes de la physique, en particulier des quatre qui devaient servir à redéfinir le kilogramme, l'ampère, la mole et le kelvin. En ce qui concerne ce dernier les méthodes expérimentales qui ont permis la détermination de k sont celles qui ont consisté à mesurer l'une ou l'autre des grandeurs suivantes :

- la constante diélectrique de l'hélium ;
- l'amplitude du bruit thermique (bruit Johnson) dans un conducteur ;
- la vitesse du son dans un gaz parfait.

La mesure la plus précise de k a utilisé la dernière méthode et a été réalisée par une équipe française du LNE-CNAM (Laurent Pitre et collaborateurs). La vitesse du son dans un gaz parfait (Ar ou He) est déduite des fréquences de résonance acoustiques du gaz dans un résonateur quasi-sphérique dont le volume est de quelques litres. On mesure ces fréquences pour des modes d'oscillation radiale, pour différentes pressions et à température donnée. La vitesse du son en est déduite et, en extrapolant celle-ci à pression nulle, on a accès au produit kT en utilisant les valeurs connues de la masse molaire du gaz et de la constante d'Avogadro. L'équipe a ainsi déterminé une valeur de la constante de Boltzmann avec une incertitude de $4,8 \times 10^{-7}$ en valeur relative¹.

La nouvelle définition du kelvin, adoptée le 16 novembre dernier par la 26^e Conférence Générale des Poids et Mesures, a donné à la constante de Boltzmann la valeur fixée $k = 1,380649 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$. Cette définition entre en application le 20 mai 2019.

Les dispositifs expérimentaux qui ont servi jusqu'ici à déterminer la valeur de k ne perdent pas leur utilité, bien au contraire. En faisant intervenir une loi physique dépendant du produit kT , ce sont eux maintenant qui serviront à la réalisation pratique de l'unité de température. ■

Petit rappel

La constante de Boltzmann

La constante de Boltzmann k_B intervient dans la proportionnalité entre l'énergie et la température d'un système à l'échelle microscopique. Le lien est assuré entre l'échelle macroscopique et l'échelle microscopique par la relation $k_B = R/N_A$ où R est la constante des gaz parfaits (intervenant dans la relation $PV = nRT$), et N_A le nombre d'Avogadro.

Boltzmann a introduit cette constante pour définir l'entropie S , une grandeur thermodynamique, par le degré de désorganisation microscopique d'un système. Actuellement l'entropie est souvent considérée comme une mesure de la quantité totale d'information nécessaire pour décrire le système.

Quantitativement, si l'on désigne par Ω le nombre d'états microscopiques pouvant décrire un état macroscopique donné, la relation dite de Boltzmann liant l'échelle macroscopique et l'échelle microscopique s'écrit :

$$S = k_B \log \Omega$$

Cette relation est gravée sur la tombe de Boltzmann au cimetière de Vienne.

1 L. Pitre *et al.*, *Metrologia* **54** (2017) 856-873.